



⑯ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑯ **Patentschrift**  
⑯ **DE 197 13 633 C 1**

⑯ Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**B 01 D 53/92**  
B 01 D 53/94  
B 03 C 3/017

⑯ Aktenzeichen: 197 13 633.8-43  
⑯ Anmeldetag: 2. 4. 97  
⑯ Offenlegungstag: -  
⑯ Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: 28. 1. 99

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑯ Patentinhaber:

Dornier GmbH, 88048 Friedrichshafen, DE

⑯ Erfinder:

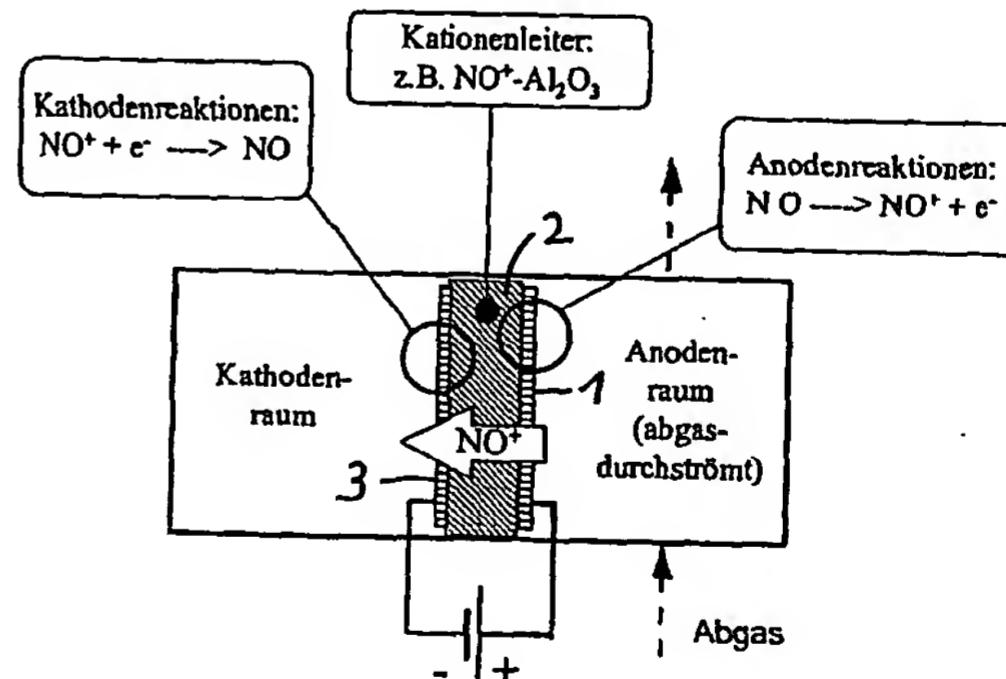
Plog, Carsten, Dr.rer.nat., 88677 Markdorf, DE;  
Andorf, Renato, Dr.rer.nat., 88074 Meckenbeuren,  
DE; Müller, Ralf, 88326 Aulendorf, DE; Schaefer,  
Wolfgang, Dr.rer.nat., 88048 Friedrichshafen, DE;  
Kayser, Armin, 88709 Meersburg, DE

⑯ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

DE 1 95 27 693 C1  
US 47 38 760  
WO 94 25 642

⑯ Verfahren zur NO-Entfernung aus motorischen Abgasen

⑯ Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Entfernung von NO aus dem Abgas von Verbrennungsmotoren, wobei das NO-haltige Abgas an eine erste Elektrode (1) geleitet wird, an der das NO anodisch zu NO<sup>+</sup> oxidiert wird, das NO<sup>+</sup> anschließend durch einen NO<sup>+</sup>-leitenden Festelektrolyten (2), der sich an die erste Elektrode (1) anschließt, zu einer zweiten Elektrode (3) transportiert wird, an der das NO kathodisch reduziert wird.



DE 197 13 633 C 1

DE 197 13 633 C 1

# DE 197 13 633 C 1

1

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Entfernung von NO aus dem Abgas von Verbrennungsmotoren, insbesondere zur Anwendung in einem Kraftfahrzeug.

Die zunehmend strenger werdende Abgasgesetzgebung erfordert die Entwicklung immer leistungsfähigerer Abgas-nachbehandlungssysteme für Kraftfahrzeuge.

Zur Erfüllung zukünftiger Grenzwerte beschreitet man bei der Entstickung magermotorischer Abgase mehrere Entwicklungsrichtungen:

### DENOX-Katalyse

Die Stickoxide werden unter Einsatz eines Reduktionsmittels, Ammoniak oder ein Kohlenwasserstoff, an einem geeigneten Katalysator zu Stickstoff und Wasser und bei Einsatz eines Kohlenwasserstoffs zusätzlich zu Kohlendioxid umgesetzt.

Bislang entwickelte DENOX-Katalysatoren verfügen über eine noch zu geringe Aktivität und Selektivität. Weiterhin ist größtenteils die Langzeitstabilität im Abgas begrenzt.

### NO<sub>x</sub>-Speicher-Katalysatoren

Der Katalysator besteht aus zwei Komponenten, einem NO<sub>x</sub>-speichernden Material und einem Dreiwegekatalysator. Die Stickoxide werden im Magerbetrieb des Motors in der Speicherkomponente als Nitrat chemisch gebunden und in einer Regenerationsphase unter stöchiometrisch oder fetten Motorbetriebsphasen freigesetzt und am Dreiwegekatalysator zu Stickstoff umgesetzt.

Die noch zu geringe Resistenz des NO<sub>x</sub>-speichernden Materials gegen SO<sub>x</sub> sowie dessen begrenzte thermische Stabilität verhindern derzeit den Serieneinsatz dieses Katalysatortyps.

### SNR-Verfahren (selektive NO<sub>x</sub>-Rückführung)

Die Stickoxide werden an einem geeigneten Material im Abgas gespeichert und nach vollständiger Beladung des NO<sub>x</sub>-Speichers über eine entsprechende Klappenschaltung in der Abgasführung über die Ansaugluft in den Motorbrennraum rückgeführt, wo die Reduktion des NO bei der Verbrennung stattfindet.

Eine noch unzureichende Beladungskapazität des NO<sub>x</sub>-Speichers, sowie dessen begrenzte Lebensdauer im Abgas verhindern bislang den Serieneinsatz des SNR-Verfahrens.

Alle aufgeführten Verfahren befinden sich derzeit noch im Entwicklungsstadium und sind nicht im Serienfahrzeug einsetzbar.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur NO-Entfernung aus motorischen Abgasen zu schaffen, mit dem die bei den bekannten Verfahren bestehenden Nachteile, insbesondere hinsichtlich Aktivität, Selektivität und Langzeitbeständigkeit überwunden werden.

Diese Aufgabe wird mit dem Verfahren nach Anspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausführungen der Erfindung sind Gegenstand weiterer Ansprüche.

Gemäß der Erfindung wird ein NO<sup>+</sup>-leitender elektrochemischer Festelektrolyt der zwischen zwei Elektroden angeordnet ist, eingesetzt, der bei Anlegen einer elektrischen Spannung dem Abgas NO entzieht und in eine Anreicherungszelle transportiert. Dabei wird NO auf der Abgasseite anodisch zu NO<sup>+</sup> oxidiert und als solches durch den Festelektrolyt transportiert. An der Kathode werden dann die Stickoxidkationen zu NO reduziert.

Als Festelektrolyt dient generell ein kationleitender Fest-

2

stoff. Als Ausführungsbeispiel sei NO<sup>+</sup>- oder Ag<sup>+</sup>-ausgetauschtes beta-Aluminiumoxid genannt.

Das erfindungsgemäße Verfahren hat gegenüber den bekannten Verfahren den Vorteil, daß die Stickoxide ohne Verwendung von zusätzlichen Reduktionsmittel aus dem Abgas entfernt werden können.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann zur Erfüllung zukünftiger Grenzwerte zur Entstickung motorischer Abgase in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden. Es kann insbesondere zur Entfernung von Stickoxiden im Abgas mager betriebener oder  $\lambda = 1$ -betriebener oder magermix-betriebener Kraftfahrzeuge eingesetzt werden.

Mit dem auf der Kathodenseite angereicherten Stickoxiden kann in einem nächsten Schritt unterschiedlich verfahren werden:

#### – Fall A

Rückführung des NO über die Ansaugluft in den Motorbrennraum (nach SNR-Prinzip) (Fig. 2).

#### – Fall B

Umsetzung des NO unter stöchiometrisch/fetten Abgasbedingungen bei magermixbetriebenen Ottomotoren (Direkteinspritzung oder Saugrohreinspritzung) (Fig. 3).

#### – Fall C

Umsetzung des NO mit gasförmigen Reduktionsmitteln (z. B. Kohlenwasserstoff, CO, H<sub>2</sub>), der an Bord des Kraftfahrzeugs erzeugt oder mitgeführt wird (Fig. 4).

#### – Fall D

katalytische Reduktion des NO mit H<sub>2</sub>, der als H<sup>+</sup> (aus abgasseitigem Wasser) ebenfalls durch den Festelektrolyt oder durch eine zusätzliche H<sup>+</sup>-leitende Membran (z. B. PEM Proton Exchange Membran) transportiert wird (Fig. 5).

#### – Fall E

Spaltung des NO auf der Kathodenseite an geeignetem Katalysator unter Freisetzung des N<sub>2</sub> (gasförmig) und Weiterleitung des Spaltsauerstoffs mittels eines an sich bekannten O<sup>2-</sup>-Ionenleiters (Fig. 6).

Die Erfindung wird anhand von Figuren näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 cinc Prinzipskizze zum Ablauf des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 2 bis 6 Verfahrensvarianten entsprechend der erwähnten Fälle A bis E,

Fig. 7 einen Versuchsaufbau zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

Fig. 8 den Verlauf von Spannung U (links, in Volt) und Stromstärke I (rechts, in mA) über der Zeit (in Minuten), gemessen an einem Versuchsaufbau nach Fig. 7.

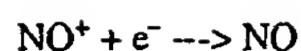
Fig. 1 zeigt das Funktionsprinzip des erfindungsgemäßen Verfahrens. Man erkennt die beiden Elektroden (Anode 1, Kathode 3), zwischen denen mittels einer externen Spannungsquelle eine bestimmte Spannungsdifferenz aufrechterhalten wird, sowie den kationenleitenden Festelektrolyten 2 zwischen den beiden Elektroden 1, 3. Als Festelektrolyt 2 wird z. B. ein NO<sup>+</sup>-ausgetauschtes beta-Aluminiumoxid eingesetzt. Das Abgas des Verbrennungsmotors durchströmt den Anodenraum. An der Anode 1 wird das NO gemäß der Reaktion



zu NO<sup>+</sup> oxidiert. Die NO<sup>+</sup>-Ionen werden durch den Festelektrolyten 2 transportiert und an der Kathode 3 gemäß der Reaktion

# DE 197 13 633 C 1

3



zu NO reduziert. Wie mit dem so auf der Kathodenseite angereicherten Stickoxiden verfahren werden kann (Verfahrensvarianten A bis E), ist in den Fig. 2 bis 6 im einzelnen dargestellt.

Fig. 2 zeigt eine erste Verfahrensvariante (Fall A), bei dem das an der Kathodenseite vorliegende NO über die Ansaugluft in den Motorbrennraum zurückgeführt wird. Im Motorbrennraum erfolgt dann analog zum oben erwähnten SNR-Verfahren die Reduktion des NO während der Verbrennung.

Dieses Verfahren hat die folgenden Vorteile: Bei dem derzeit in der Entwicklung befindlichen SNR-Verfahren ist bislang kein NO-speicherndes Material mit hinreichend hoher Langzeitstabilität im Abgas bekannt. Das beschriebene Verfahren kann die NO-Anreicherung mittels NO-Adsorptions vollständig ersetzen. Ein weiterer Vorteil liegt im kontinuierlichen Betrieb des Verfahrens. Das auf NO-Adsorption basierte SNR-Verfahren muß auf Grund der Adsorptions- und Desorptionsphase zyklisch betrieben werden.

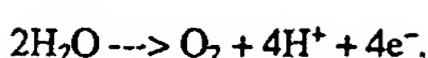
Fig. 3 zeigt den Fall B, bei dem das an der Kathodenseite vorliegenden NO unter stöchiometrischen oder fetten Abgasbedingungen bei magermixbetriebenen Ottomotoren (Direkteinspritzung oder Saugrohreinspritzung) umgesetzt wird. Dabei wird der Abgasfluß über eine Abgasklappe gesteuert. Bei magerbetriebenem Motor werden die Motorabgase in den Anodenraum geleitet, wo das NO erfundungsgemäß zu  $\text{NO}^+$  oxidiert wird. Bei stöchiometrischem ( $\lambda = 1$ ) oder fettem ( $\lambda < 1$ ) Betrieb wird das Abgas durch den mit NO angereicherten Kathodenraum und weiter an einen an sich bekannten Dreiwegekatalysator geführt.

Vorteile: Für die Anwendung in magermixbetriebenen Ottomotoren befinden sich  $\text{NO}_x$ -Speicher-Katalysatoren in der Entwicklung. Auf Grund der geringen Resistenz gegen  $\text{SO}_x$  und hohe Temperaturen stellt dabei das  $\text{NO}_x$ -speichernde Material (Nitrat-Speicher) ein besonderes Problem dar. Durch das beschriebene Verfahren kann auf diese Komponente vollständig verzichtet werden.

Fig. 4 zeigt eine Ausführung, bei der das kathodenseitig vorliegende NO unter Einsatz eines Reduktionsmittels an einem Katalysator umgesetzt wird (Fall C). Das gasförmige Reduktionsmittel, z. B. Kohlenwasserstoffe,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ , wird in den Kathodenraum eingeleitet. Als Katalysator kann insbesondere ein Dreiwegekatalysator oder ein NO-Spaltkatalysator eingesetzt werden. Der Katalysator kann auf der Kathode 3 angeordnet oder dem Kathodenraum nachgeschaltet sein. Das Reduktionsmittel kann an Bord des Kraftfahrzeugs erzeugt werden oder in einem Tank mitgeführt werden.

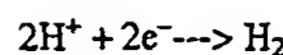
Die Reduktion des NO auf der Kathodenseite mit dem gasförmigen Reduktionsmittel kann durch die Abwesenheit des Sauerstoffs hochselektiv durchgeführt werden. Dadurch werden höhere NO-Umsätze bei gleichzeitig verringertem Reduktionsmittelbedarf erzielt.

Fig. 5 zeigt Fall D als weitere Ausführung der Erfindung, bei der das kathodenseitig vorliegende NO durch katalytische Reduktion mit  $\text{H}_2$  umgesetzt wird. Der Festelektrolyt 2, z. B. beta- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , kann neben den  $\text{NO}^+$ -Ionen auch  $\text{H}^+$ -Ionen transportieren. Die Kathode 3 ist mit einem an sich bekannten DENOX-Katalysator beschichtet. Bei dem dargestellten Aufbau treten neben den  $\text{NO}^+$ -Ionen auch  $\text{H}^+$ -Ionen durch den Festelektrolyten 2 hindurch. Die  $\text{H}^+$ -Ionen stammen von dem im Motorabgas vorhandenen Wasser nach der Reaktion:

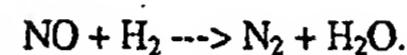


4

Die  $\text{H}^+$ -Ionen werden an der Kathode gemäß der Reaktion



5 zu  $\text{N}_2$  reduziert. Am DENOX-Katalysator an der Kathode 3 erfolgt die Reaktion

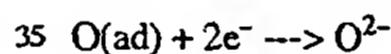
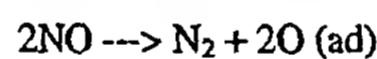


10 Neben der beschriebenen Ausführung, bei der sowohl  $\text{NO}^+$  als auch  $\text{H}^+$ -Ionen durch den Festelektrolyten 2 transportiert werden, ist auch eine alternative Anordnung möglich, bei der neben einem  $\text{NO}^+$ -leitenden Festelektrolyten zusätzlich ein weiterer,  $\text{H}^+$ -Ionen leitender Festelektrolyt 15 vorhanden ist, z. B. eine PEM (Proton Exchange Membran).

Die Reduktion des NO mit gleichzeitig an der Kathode generiertem Wasserstoff kann durch die Abwesenheit von Sauerstoff hochselektiv durchgeführt werden.

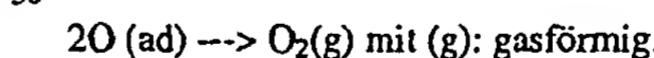
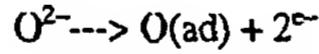
20 Ein weiterer Vorteil ist in der im Verfahren enthaltenen on-board-Erzeugung des Wasserstoffs zu sehen. Wasserstoff verfügt über ein hohes Reduktionspotential.

25 Fig. 6 schließlich zeigt eine Ausführung (Fall E), bei der das kathodenseitig vorliegende NO katalytisch zu  $\text{N}_2$  und  $\text{O}^{2-}$  reduziert wird, wobei die  $\text{O}^{2-}$ -Ionen anschließend durch einen  $\text{O}^{2-}$ -leitenden Festelektrolyten 4, weitergeleitet werden. Im einzelnen ergibt sich folgender Aufbau: Wie bei den vorhergehenden Ausführungsbeispielen sind Anode 1,  $\text{NO}^+$ -Ionen-leitender Festelektrolyt 2, z. B.  $\text{NO}^+$ -ausgetauschtes  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sowie Kathode 3 vorhanden. Die Kathode 3 ist mit einem NO-Spaltkatalysator beschichtet, an dem das kathodenseitige NO nach der Reaktion



gespalten wird.

40 Zusätzlich zu den bisher beschriebenen Elementen ist eine weitere, anodisch geschaltete Elektrode 5 vorhanden, wobei zwischen dieser weiteren Elektrode 5 und der Kathode 3 eine Spannungsdifferenz besteht. Zwischen Elektrode 3 und der weiteren Elektrode 5 ist ein  $\text{O}^{2-}$ -leitender Festelektrolyt 4, z. B. Zirkondioxid angeordnet. Da an der Kathode 3 entstehende Spaltstauerstoff  $\text{O}^{2-}$  wird durch den 45  $\text{O}^{2-}$ -leitenden Festelektrolyten 4 hindurch an die weitere Elektrode 5 transportiert, dort entladen und als  $\text{O}_2$ -Moleküle abgegeben:



55 Bei der beschriebenen Verfahrensvariante kann auf den Einsatz eines Reduktionsmittels vollständig verzichtet werden. Die eingesetzte elektrische Energie wird selektiv nur zum Transport des NO durch den Elektrolyten verwendet.

60 Fig. 7 zeigt einen Versuchsaufbau zur Durchführung des erfundungsgemäßen Verfahrens. An eine  $\text{Ag}^+$ -ausgetauschte beta- $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Membran 2 (Festelektrolyt), die einseitig NO-haltigem Gas ausgesetzt ist, wird über zwei Pt/Ru-Elektroden 1, 3 eine Spannung angelegt, die langsam gesteigert wird. Es fließt ein Strom, der mit der Spannung zunimmt. Bei Abschalten des NO-haltigen Gas geht der Strom trotz konstanter Spannung zurück. Damit ist der Stromfluß eindeutig auf die Umsetzung von NO zurückzuführen.

65 Fig. 8 zeigt die entsprechenden zeitlichen Verläufe von Spannung und Stromstärke.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Entfernung von NO aus dem Abgas von Verbrennungsmotoren, dadurch gekennzeichnet, daß das NO-haltige Abgas an eine erste Elektrode (1) geleitet wird, an der das NO anodisch zu  $\text{NO}^+$  oxidiert wird, das  $\text{NO}^+$  anschließend durch einen  $\text{NO}^+$ -leitenden Festelektrolyten (2), der sich an die erste Elektrode (1) anschließt, zu einer zweiten Elektrode (3) transportiert wird, an der das NO kathodisch reduziert wird. 5
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das auf der Kathodenseite vorliegende NO über die Ansaugluft in den Motorbrennraum geführt und dort umgesetzt wird. 10
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das auf der Kathodenseite vorliegende NO unter stöchiometrischen oder fetten Abgasbedingungen an einem Dreiwegekatalysator umgesetzt wird. 15
4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das auf der Kathodenseite vorliegende NO mittels eines gasförmigem Reduktionsmittels katalytisch umgesetzt wird. 20
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das auf der Kathodenseite vorliegende NO mit  $\text{H}_2$  katalytisch reduziert wird, wobei der benötigte Wasserstoff aus dem abgasseitigem Wasser stammt, und durch den Festelektrolyten (2) oder durch eine zusätzliche  $\text{H}^+$ -leitende Membran auf die Kathodenseite transportiert wird. 25
6. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das auf der Kathodenseite vorliegende NO katalytisch zu  $\text{N}_2$  und  $\text{O}^{2-}$  reduziert wird, wobei die  $\text{O}^{2-}$ -Ionen anschließend durch einen  $\text{O}^{2-}$ -leitenden Festelektrolyten (4), der sich an die zweite Elektrode (3) anschließt, weitergeleitet werden. 30
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Festelektrolyt ein mit  $\text{Ag}^+$ - oder  $\text{NO}^+$ -ausgetauschtes beta-Aluminiumoxid ist. 35

40

Hierzu 8 Seite(n) Zeichnungen

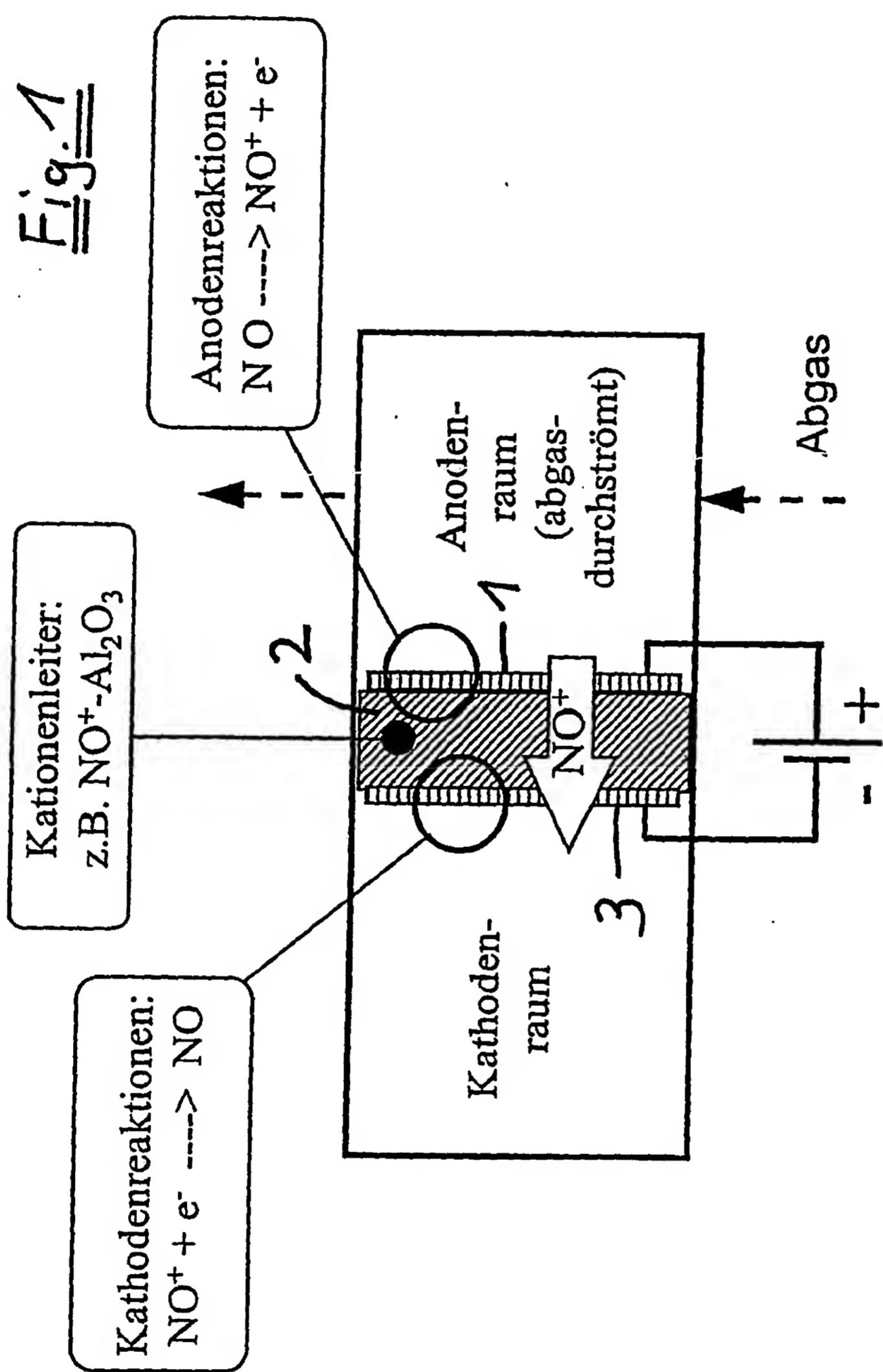
45

50

55

60

65

Fig. 1

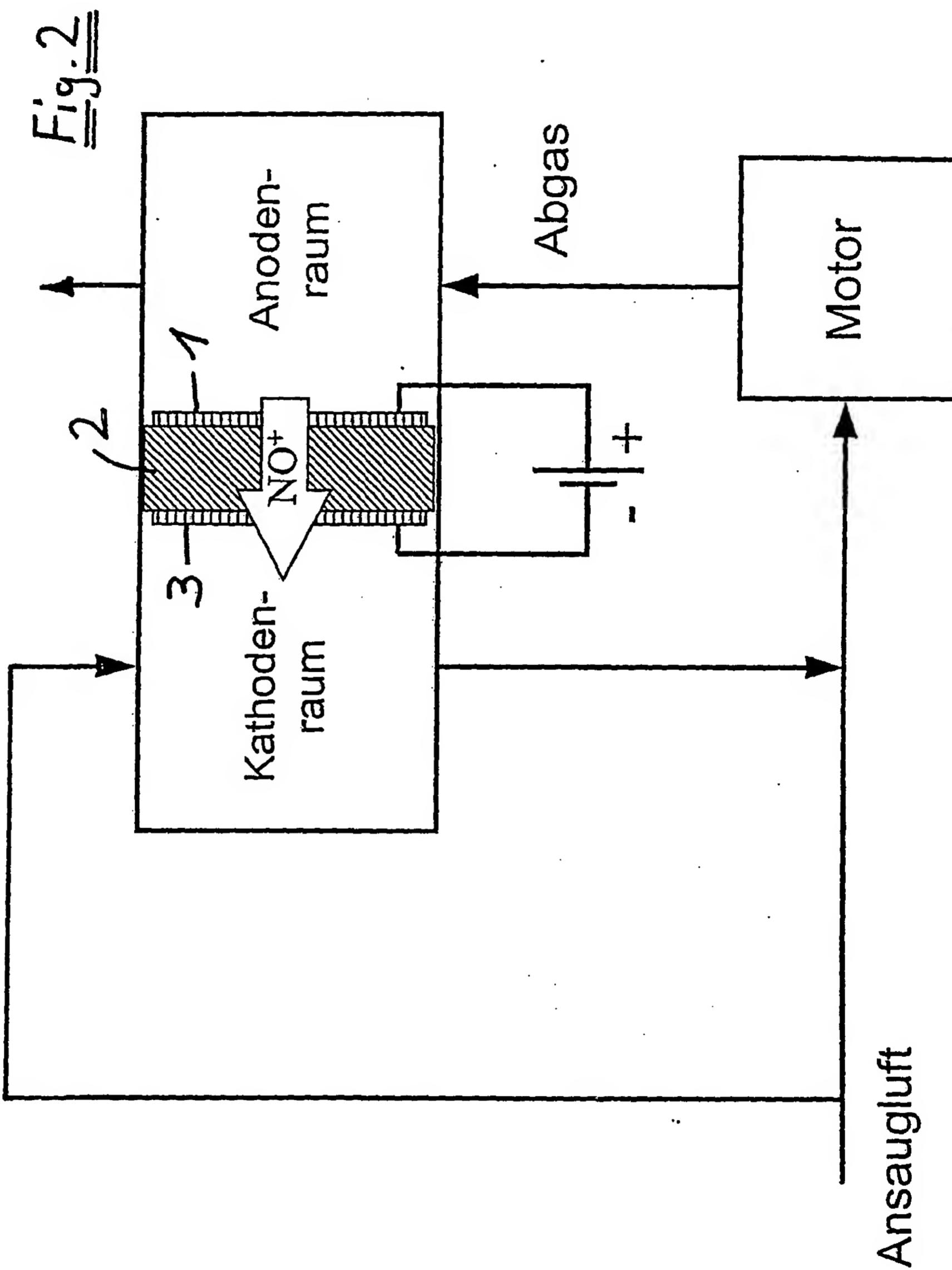
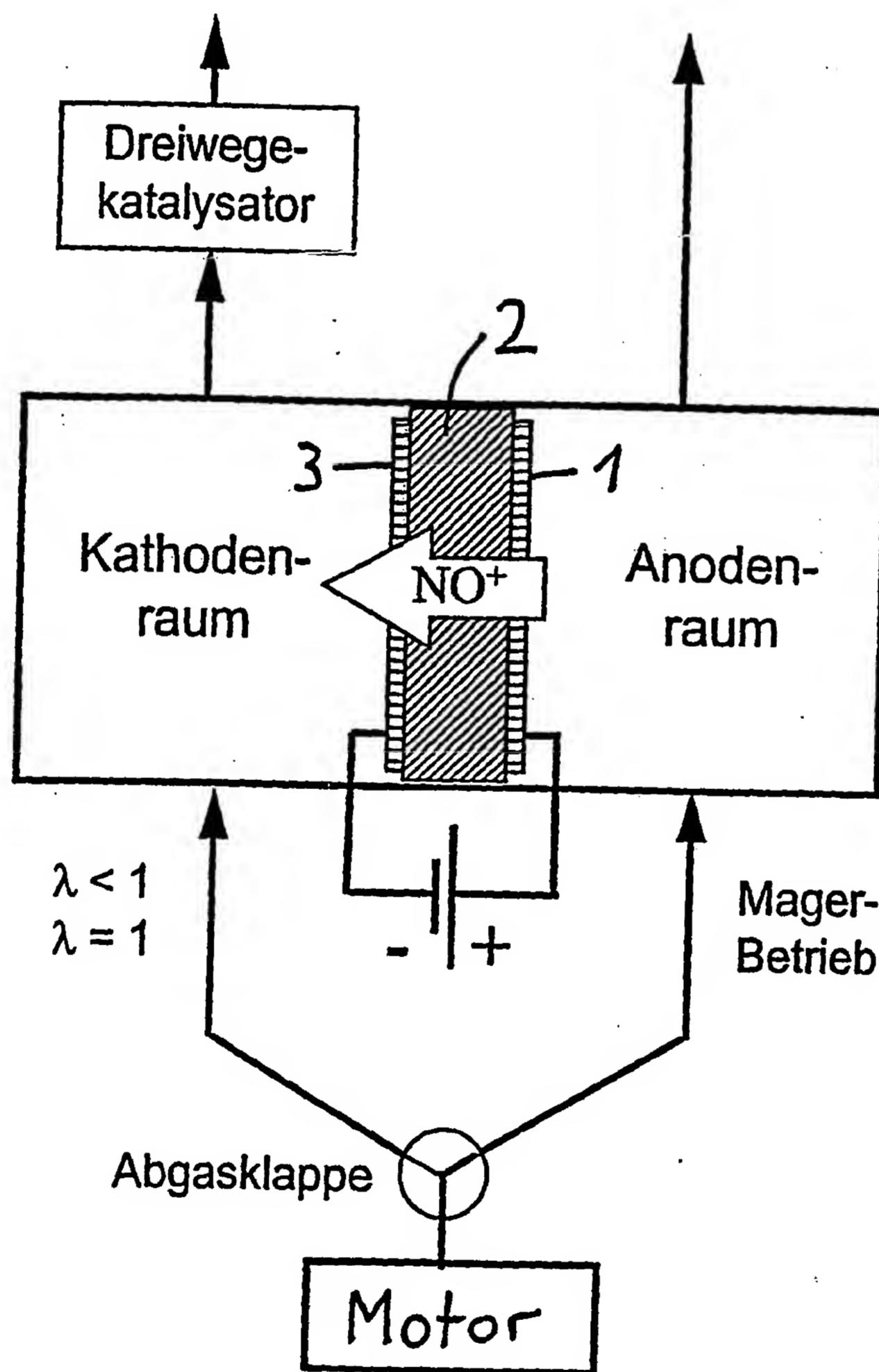
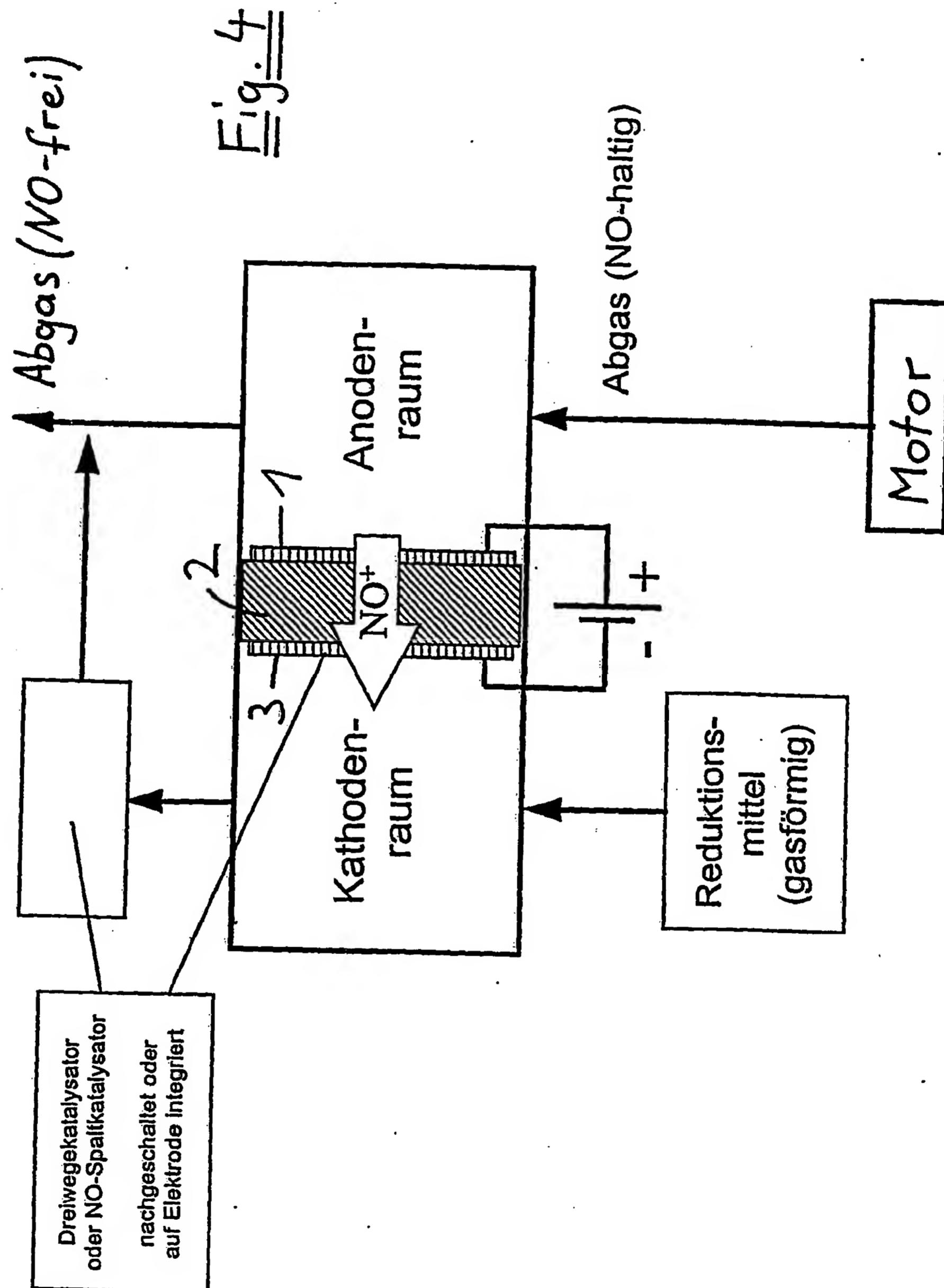
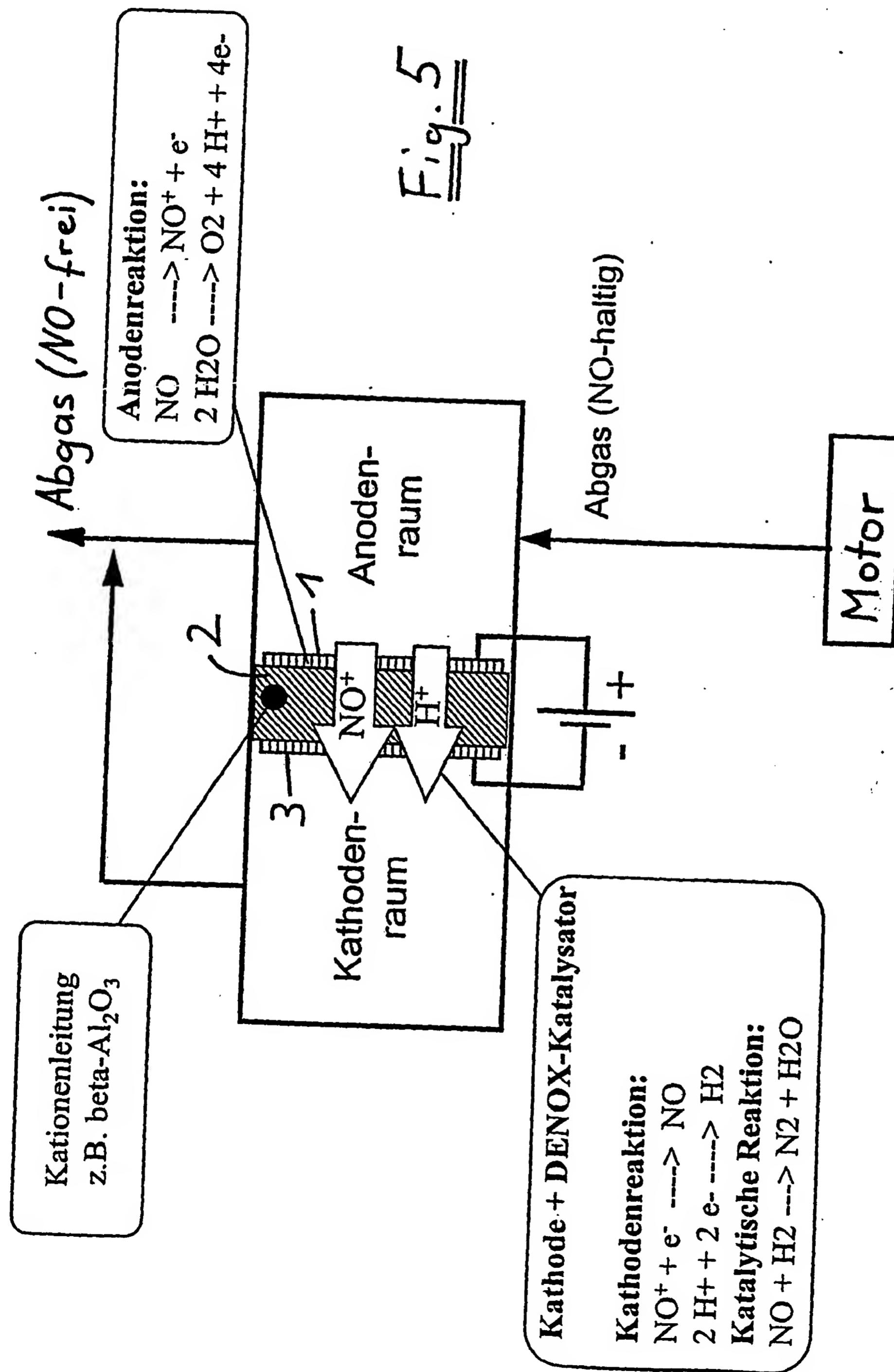


Fig. 3





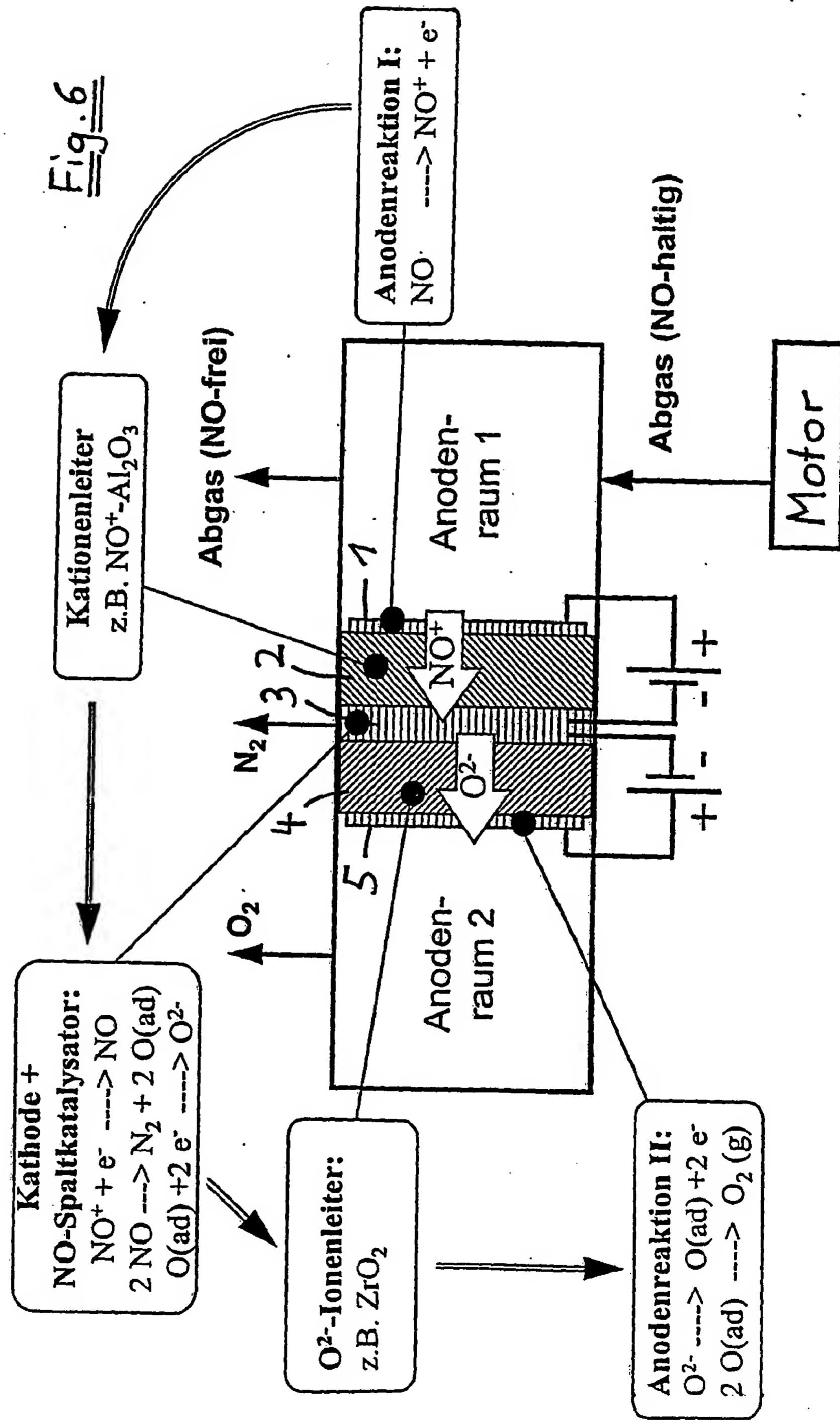


Fig. 7

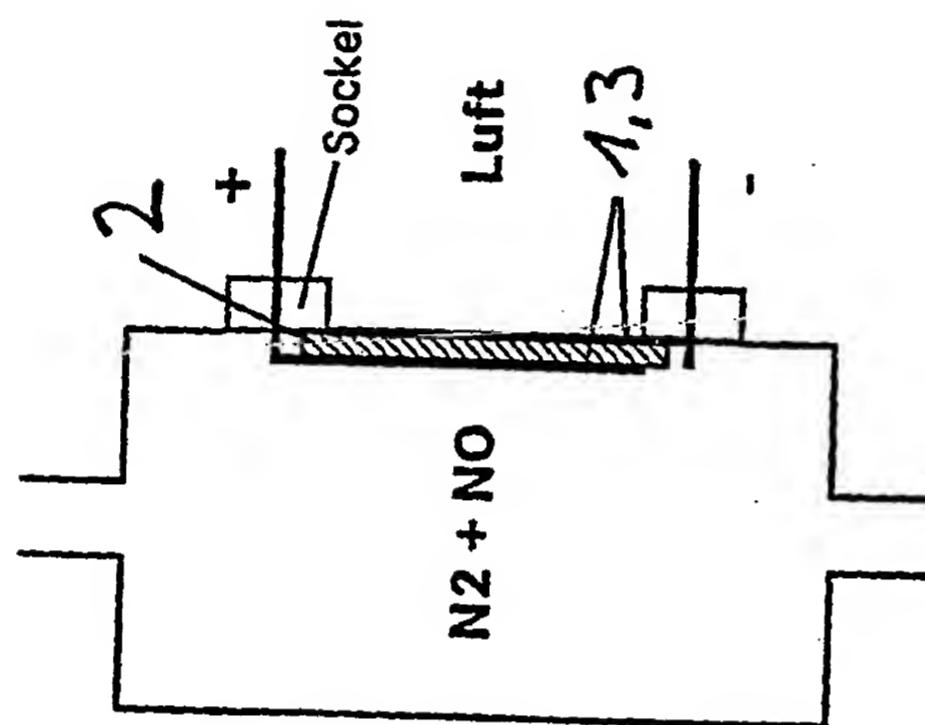


Fig. 8

